

製品精度の一桁の向上を目指したインプロセス精密計測手法に関する研究

著者	古川 勝
号	3321
発行年	2004
URL	http://hdl.handle.net/10097/8593

氏 名	ふるかわ まさる
授 与 学 位	古 川 勝
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成 17 年 3 月 25 日
研究科, 専攻の名称	学位規則第 4 条第 1 項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械電子工学専攻
指 導 教 官	製品精度の一桁の向上を目指したインプロセス精密計測手法に 関する研究
論文審査委員	東北大学教授 清野 慧
	主査 東北大学教授 清野 慧
	東北大学教授 江村 超
	東北大学教授 井上 克己
	東北大学助教授 高 偉

論文内容要旨

高精度な加工製品を作るためには、加工現場で加工機の運動精度よりも高い精度で加工品形状を計測することが重要である。本論文は、加工製品の精度を一桁向上させることを目指して、加工現場で従来よりも高い精度での計測を可能にするための手法に関して研究を行ったものである。加工機では、基本的に加工ツールの運動及びそれに伴う運動の誤差が加工物に転写される。運動の誤差を分離した形で加工品形状を計測することができれば、計測結果を基に運動の誤差を補正することによって、より高精度な加工が可能になる。具体的な精密加工品を対象に、加工品の精度を向上させるための計測手法の取り組みを行った。

第 1 章 緒論

加工機では、基本的に加工プローブの運動が加工物に転写され、加工製品が作られる。このとき、加工プローブの運動に作業者が意図しない誤差があれば、その動きも加工物に転写される。加工物の計測のときも、運動の誤差があると誤差を含んで計測してしまう問題を生じる。このとき、運動の誤差を分離し計測を行うことができれば、計測結果を元に運動の誤差の補正を行うことで、より高精度な加工が可能になる。本研究では、知的計測の手法や加工対象に応じた種々の誤差低減の手法を用いて、運動誤差等の計測の不確かさを分離し、迅速、高精度に計測するための取り組みを行う。

本研究により、加工物の形状と運動の誤差を分離した高精度な精密形状計測が加工現場で可能になる事が見込まれる。加工現場で計測できる為、得られた運動の誤差を元に、加工法へのフィードバックを迅速に行うことが可能になる。それにより、加工物の付加価値を高めたり、作業者に加工技術の向上を促すことが可能にしたりすることが可能になり、加工現場の技術力を向上させることにつながる。最終的に本研究を通して、加工現場で使える高精度な計測技術を構築することで、製品精度が 1 桁以上向上した精密加工物を製造することが可能になると考えられる。

本研究で行うことをまとめると、「加工工場内という精密計測には劣悪な条件下で加工物の形状を高精度に計測する方法の研究を行うこと」と、「計測手法を実際に加工工程内に導入し、研究成果を実用化させること」にある。そしてこれらを通し、「工場で生産される加工物の精度向上を目指すこと」にある。本研究では、「波動歯車装置の歯車の歯切り量計測」、「塗布工具のスリット幅計測」、「塗布工具の内面のスリット幅計測」、「長尺工具の面の真直度計測」という具体的な計測テーマを取り上げる。

第 2 章から第 5 章では、計測テーマ毎に一つの章を構成する。

第2章 波動歯車装置の加工プロセスにおける精密形状計測

波動歯車装置の重要なパーツであるフレクスプライン (FS) は、図 2-1 に示すように薄肉円筒の外周に歯型が切られている構造であり、外力により変形しやすい特徴を持つ。FS の歯型形状は、波動歯車装置の伝達効率に影響を与えるため、歯切り工程で迅速に加工後の形状計測を行い、歯切り量の誤差を速やかに補正する事が不可欠である。本章では、加工工程で歯切り量を高精度に計測するための手法に関して取り組みを行う。

従来行われてきた、オーバーピン法による計測の代わりに、図 2-2 に示すように 2 本のレーザー変位計を使って歯切り量の偏差を求める方法を提案する。変位計測定点での歯厚が異なると、変位計の出力値が変化することから、一方の変位計の出力値を基準にして、他方の変位計の出力を比較することにより、FS の位置あわせ誤差に影響されずに歯切り量の偏差を求めることを可能にする。加工現場で用いるために、FS 取り付け時の偏心や軸の回転誤差の影響を除去するための手法の提案や、切削油の影響を低減するため手法に関しての取り組みを行う。

実際の FS を用いて、 $\pm 2\mu\text{m}$ (3σ) の繰り返し性で本計測法が有効であることを示した (図 2-3)。加えて、加工現場での機上計測に向けて、製造工場の歯車加工機の中に計測装置を配置し、実験を行った。実験では、切削油の影響と FS 回転軸－変位計間距離の距離の変化を評価し、機上計測に向けての所見を得た。

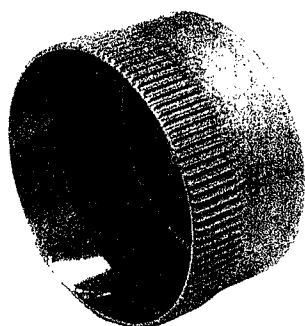


Fig.2-1 Flex spline

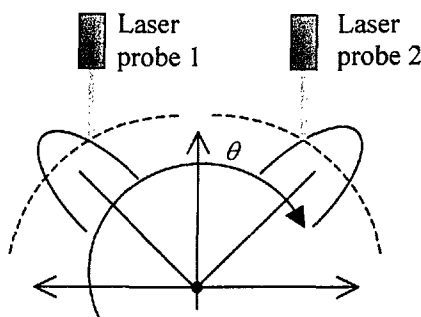


Fig.2-2 Measurement principle

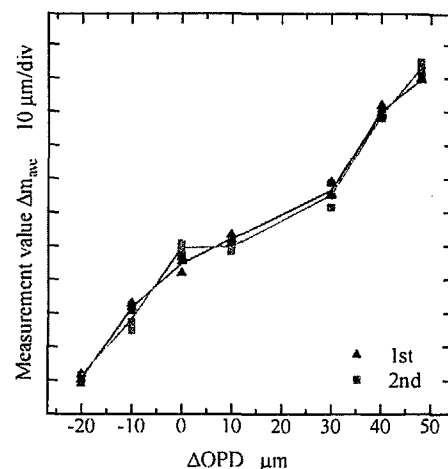


Fig.2-3 Measurement result

第3章 塗布工具先端スリット幅のインプロセス精密計測

塗布工程で用いられる幅が数百 μm のスリットを持つ、長さが1~2m前後の高精度塗布工具は、内部に液体を流すと、スリット部から液体が染み出す構造を持ち、フィルム等にその流体を塗布する構造になっている。この塗布工具はスリット幅の精度が工具の塗布性能に直結するため、塗布工具を加工する現場でスリット幅を1 μm 程度の精度で計測することが品質管理上重要な課題となっている。本章では、塗布工具のスリット幅を加工現場で高精度に計測する取り組みを行う。

従来隙間ゲージを用いて行われていたスリット幅計測に対し、非接触測定が可能な CCD カメラをスリットにそって走査し (図 3-1)、スリット幅を迅速、高精度に計測する方法を提案する。CCD カメラ走査時の、送り装置の運動誤差の影響や加工現場の外乱振動による影響、塗布工具上面の高さによる計測値への影響に関しては、スリット幅検出時の処理方法を工夫し、影響を受けにくくする方法についての提案および確認を行う。

図 3-2 に計測結果を示す。0.25 μm 以下の繰り返し性で計測することができた。計測に要する時間を、従来の 1.4m で 15 分から 30 秒で行えるようにすることができた。測定点数も従来の 1.4m で 10 数点から 1000 点以上に増やし、送り方向のスリット幅変化を細かく得ることができた。また、従来隙間ゲージを用いた計測で

は、スリット幅毎に対応するゲージが必要で、スリット幅によっては $1\mu\text{m}$ の分解能しか得られなかったが、本計測法では、塗布工具のスリット幅によらず計測可能で $0.2\mu\text{m}$ の分解能を得る事ができた。

最終的に、実際に加工工場内で使用するための計測装置の作成を行い、実際のラインで使用されるに至った。

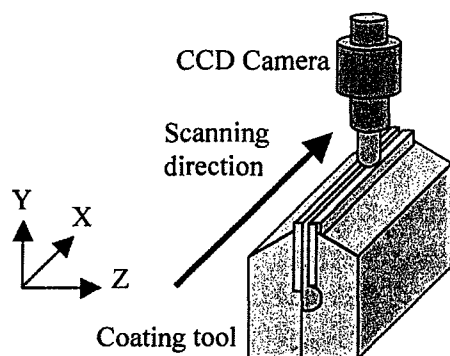


Fig.3-1 Coating tool and measurement principle

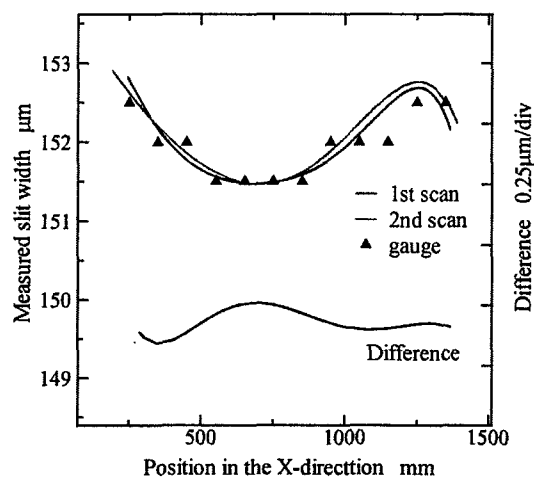


Fig.3-2 Measurement result

第4章 塗布工具内部3次元スリット幅のインプロセス精密計測

塗布工具のスリット幅計測において、第三章では、スリット先端部のスリット幅計測に関して述べたが、スリット内部の形状も塗布性能に直結するため、加工現場でスリット内面のスリット幅を高精度に検査することも重要な課題となる。本章では、スリット内部のスリット幅を求めるための手法について、計測方法の提案と計測結果の報告を行う。

塗布工具内部のスリット幅に関して、複数のプローブを用いて走査に伴う運動誤差の影響を除去し、塗布工具スリット内部の3次元スリット幅を迅速、高精度に測定する方法に関して取り組みを行う(図4-1)。プローブユニット走査に伴う送り装置の運動誤差の影響は、プローブユニットに対向配置された二つのプローブの出力値を演算することで取り除く。図4-2に計測結果を示す。この時スリット幅は、プローブの安定性から $0.5\mu\text{m}$ の不確かさで計測可能であることを示した。

実際の塗布工具を用いて加工現場で計測実験を行い、提案した手法の有効性を確認した。計測実験の結果を元に加工現場で使用する計測システムを構築した。

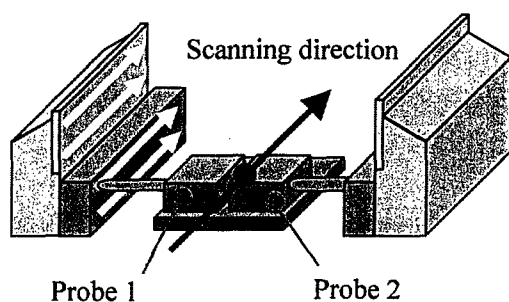


Fig.4-1 Measurement principle

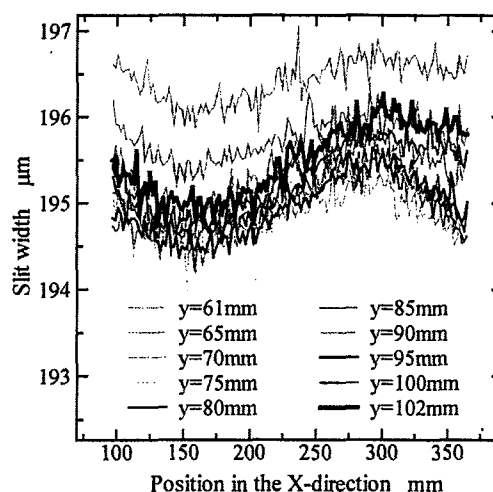


Fig.4-2 Measurement result

第5章 長尺工具のインプロセス精密真直度計測機の開発

精密加工品の大型化につれて、高精度長尺工具の用途が広がってきており、長尺工具の真直度をその場で高精度に計測したいという要望が高まっている。しかし、8mにも及ぶ長尺工具の真直度を計測する場合、従来行われていた干渉計や直定規のような高精度な基準を使って真直度を求める方法では、要求精度を満たすことが難しい。本章では、加工現場で8mに及ぶ長尺工具の真直度を、知的計測の手法を用い、その場で基準を作りながら高精度に計測する手法に関する研究を行う。

多点法や反転法といった、高精度な基準を必要としない知的計測の概念を利用した真直度計測法の提案を行い、5mのステージを用いて基礎実験を行った。実験結果を図5-1に示す。複数の計測方法で同様な計測結果が得られた。基礎実験の結果から、長尺工具の真直度計測に関して形状の2次成分が不要なときに行う、3点法を用いた真直度計測と、全ての形状成分が必要な場合に行う、反転法および改良型反転法を採用した計測装置の設計を行った。

基礎実験結果を元にし、工場内で使用する8mのストロークを持つ長尺工具計測装置を開発し、加工現場に導入した。図5-2に走査ステージの運動を計測した結果を示す。

3点法を用いた真直度計測では、 $0.5\mu\text{m}$ 以下の不確かさを含む真直度計測ができることを確認し、反転法を用いた真直度計測では、8mの全長に渡って、 $1\mu\text{m}$ 以下の不確かさを含む真直度計測ができることを確認した。両方の手法において、真直度計測の要求精度を満たすことを確認し、他に類を見ない、長尺計測システムの実用化に至った。

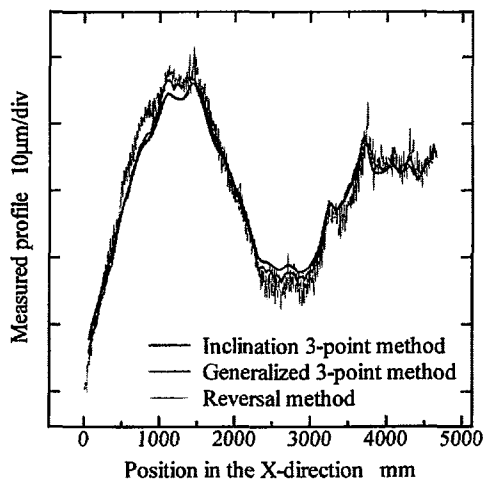


Fig.5-1 Measurement result

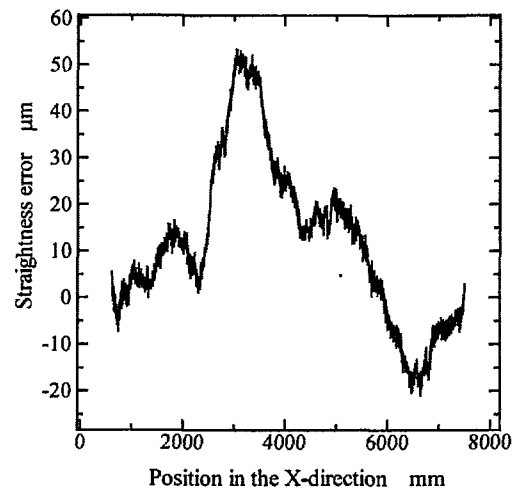


Fig.5-2 Measurement result

第6章 結論

本研究では、具体的なテーマを通して、加工工場内という精密計測には劣悪な条件下で加工物の形状を高精度に計測する方法の研究を行った。従来加工現場では実用されることの少なかった種々の知的計測の手法を加工現場に導入することで、計測の基準となる回転機構や走査機構の運動の影響を分離して、高精度な計測を行う手法に関して取り組みを行った。また合わせて切削油の対策や外乱振動の除去、電気的ノイズの検討など加工現場で必要となる対策を行った。

本研究により、従来加工現場では実現し得なかったレベルの高精度な精密形状測定が加工現場で容易になり、長大な加工物の形状も高精度に計測することができるようになった。加工現場で計測できる為、計測結果の加工法へのフィードバックを迅速に行うことや、それにより、加工物の付加価値を高め、加工現場の生産技術を向上させることも可能になる。最終的に本研究成果を通して、製品精度が1桁以上向上した精密加工物を製造することが可能になると考えられる。

論文審査結果の要旨

高精度な加工製品を作るためには、加工現場で加工機の運動精度よりも高い精度で加工品形状を計測することが重要である。本論文は、加工製品の精度を一桁向上させることを目指して、加工現場で従来よりも高い精度での計測を可能にするための手法に関して研究を行ったものである。加工機では、基本的に加工ツールの運動及びそれに伴う運動の誤差が加工物に転写される。運動の誤差を分離した形で加工品形状を計測することができれば、計測結果を基に運動の誤差を補正することによって、より高精度な加工が可能になる。本論文では、具体的な加工品を対象に、加工品の精度を向上させるための計測手法の取り組みを行っている。

第1章は緒論であり、研究の背景と目的を述べている。

第2章では、波動歯車装置用の歯車(フレクスプラインFS)の歯切り工程における、切り込み量偏差計測に関する手法と計測結果、およびその手法の加工現場への適用について述べている。ピンゲージとマイクロメータを用いる従来法の代わりに2本のレーザー変位計を使って、非接触、迅速に切り込み量偏差を求める方法を提案している。基礎実験で $2\mu\text{m}$ (3σ)の繰り返し精度を実現したことで本計測法の有効性を示している。また、FS取り付け時の不確かさが計測値に影響しないことを実験的に確認している。加工現場での機上計測に向けて、製造工場の歯車加工機に計測装置を組み込んで機上計測実験を行った。実験では、切削油の影響を除去する方法を開発することと共に加工機の熱ドリフトによる変位計出力の変化を定量的に評価することによって、機上計測を実現するための所見を得ている。これは有益の成果である。

第3章では、塗布工具のスリット幅計測において、非接触計測が可能なCCDカメラを用いて迅速、高精度に計測する方法について検討している。2値化処理の閾値を最適に選ぶことによって、CCDカメラ走査時に伴う送り装置の運動誤差や外乱振動などによる計測値への影響を低減させる方法を提案している。基礎実験及び機上計測実験を行い、提案の方法の有効性を確認した後、実際に加工工場内で使用するための自動計測装置を開発している。隙間ゲージを用いる従来法に比べて、自動計測装置の計測時間は1/60に短縮されると共に、計測点数は100倍に増える効果を得ている。また計測分解能も従来法の5倍程度向上している。これは理論的にも実用的にも大きな成果である。

第4章では、第3章と同じ塗布工具の内部スリット幅計測について述べている。複数のプローブを用いて走査に伴う運動誤差の影響を除去することによって、スリット内部の3次元スリット幅を迅速、高精度に計測する方法を提案している。計測時のプローブユニット送り装置の運動誤差の影響は、ユニットに対向配置された二つのプローブの出力値を演算することで取り除いている。また、塗布工具結合時のスリット幅変形に関する検討を行い、結合時のスリット幅が単体の測定結果から求める方法を示している。基礎実験の結果を基に加工現場で使用する計測システムを構築し、 $0.5\mu\text{m}$ の安定性で計測可能なことを示している。これは実用上重要な成果である。

第5章では、加工現場で8mに及ぶ長尺工具の真直度を計測する手法について検討している。干渉計や直定規のような外部基準を使う方法では基準精度の維持が困難であるため、外部基準を必要としない知的計測の手法を8m長尺工具真直度計測に適用することになっている。複数のプローブを使う多点法と計測試料を反転させる反転法について検討した結果、従来それぞれ単独で使うこれらの手法を統一的に扱うことによって、8m長尺工具真直度の低周波と高周波成分の両方を高精度に計測する方法を確立している。それに基づいて、工場内で使用する長尺工具計測装置を開発し、8mの全長に渡って $1\mu\text{m}$ 以下の不確かさを含む真直度計測ができることを確認している。これは世界でも類の見ない成果で、高く評価される。

第6章は、結論である。

以上を要するに本論文は、従来加工現場では実用されることの少なかった種々の知的計測の手法を加工現場に導入できるようとり組み、実用的な計測装置を開発したものであり、加工現場での超精密計測に一石を投じるものである。さらに、今まで加工現場で達成できなかった精度で加工結果を定量的に評価できるようにするものであり、加工品のさらなる精度向上を通じて精密工学ひいては生産工学に寄与できるところが大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。